

Estimación de la infiltración en suelos mediante la utilización del “AHFO method”

Leonor Rodríguez-Sinobas¹, María Gil¹, Javier Benítez¹

Raúl Sánchez¹, Luis Juana¹, Guillermo Castañón¹ y Francisco V. Laguna¹,

¹. *HIDER Grupo de investigación Hidráulica del Riego, Universidad Politécnica de Madrid*

leonor.rodriguez.sinobas@upm.es, gi.hider@upm.es

Resumen

Se ha caracterizado la infiltración de un suelo colocado en una columna de suelo de metacrilato, de base hexagonal de diagonal 1 m y 0,6 m de alto, con una densidad aparente de 1,5 g/cm³. El procedimiento utilizado ha sido la fibra óptica y el método denominado “Active Heating pulse method with Fiber Optic temperature sensing” AHFO method, que consiste en emitir un pulso óptico con láser y medir en el tiempo la señal reflejada, de baja intensidad, en diferentes puntos de la fibra óptica. Del espectro de luz reflejada solamente un rango de frecuencias específico, determinado por análisis de frecuencia, se correlaciona con la temperatura. La precisión en la medida es de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ en una distancia de $\pm 12,5$ cm. En el interior de la columna se colocó el cable de fibra óptica formando tres hélices concéntricas separadas 20 cm, 40 cm y 60 cm del centro. Asimismo, se cubrió la superficie del suelo con una altura media de agua que osciló entre 1,5 a 2,5 cm a lo largo de los 140 min que duró el proceso de calentamiento del cable. El incremento de temperatura antes y después del calentamiento se utilizó para determinar la infiltración instantánea a partir de la expresión de Perzlmair et al (2004) y de los números adimensional de Nusselt y Prandtl. Considerando los errores inherentes al procedimiento de cálculo, los resultados muestran que el AHFO method es una herramienta útil en el estudio de la variabilidad espacial de la infiltración en el suelo que permite, además, determinar su valor. Asimismo, muestra su potencial para incluir dichas estimaciones en la calibración de modelos relacionados con la gestión de recursos hídricos.

1 Introducción y objetivos

La infiltración es una de las componentes del ciclo hidrológico cuya estimación es de interés para mejorar la gestión de recursos hídricos de una cuenca. La medida de la infiltración del riego es complicada y no suele realizarse, ofreciéndose en su lugar estimaciones que corresponden a un porcentaje del volumen de agua aplicada al riego. Un entendimiento de los principios físicos implicados en el proceso permitirá elaborar criterios más precisos sobre su manejo y adecuación a determinados suelos mejorar el rendimiento (eficiencia) de riego, reducir la filtración profunda de agua y fertilizantes y a ahorrar energía.

La fibra óptica ha sido muy utilizada en el área de las comunicaciones. Sin embargo, entre sus aplicaciones más recientes, destaca la de su uso para medir la temperatura incluso en grandes distancias (hasta 10 km) y con una alta frecuencia temporal, lo que ha abierto un amplio abanico de posibilidades muy importantes en el seguimiento medioambiental (Selker et al. 2006a; 2006b, Westhoff et al., 2007; Freifeld et al., 2008). La precisión en la medida puede alcanzar $0,1^{\circ}\text{C}$ en una distancia de 12,5 cm. El método utilizado en este trabajo es el denominado “Distributed Fiber Optic Temperature Measurement” (medida distribuida de la temperatura con fibra óptica) o DFOT, que consiste en emitir un impulso óptico con láser y medir en el tiempo la señal reflejada en diferentes puntos de la fibra. Este método se ha utilizado en el estudio de filtraciones de minas abandonadas (Selker et al. 2006a) y en proyectos relacionados con el cambio climático, como en el estudio del deshielo en glaciares y balances hídricos en pequeñas cuencas (Selker et al. 2006b).

Además, en medios porosos, se ha usado, con buenos resultados para la detección de rotura de diques en presas (Perzlmair et al. 2004a y 2004b) y para la detección de entrada de agua en vertederos urbanos con cubierta vegetal (Weiss, 2003). Recientemente, Sayde et al. (2010) han demostrado, en una columna de suelo, la fiabilidad del “AHFO heat pulse method” para obtener medidas precisas del contenido de humedad del suelo a

estas escalas y un amplio rango de contenidos de humedad con un método nuevo de la integral térmica. El error en la medida del contenido de humedad (volumétrico) fue menor del 10%. Gil et al. (2011), utilizando este mismo método correlacionaron dicha variable con el contenido de humedad con un error máximo del 4%, asimismo, observaron la evolución del bulbo mojado de un gotero colocado en una columna durante el riego.

Los objetivos del trabajo son: evaluar el potencial de los pulsos caloríficos y de la técnica DTS en la estimación de la infiltración y observar su variabilidad en una gran columna de suelo.

2 Materiales y métodos

2.1 Columna de suelo

Un suelo procedente de un campo regado se colocó en una columna de metacrilato con base hexagonal de diagonal 1 m y 0,6 m de alto (Fig. 1a) en cuyo interior se colocó el cable de fibra óptica del modelo BruSteel (Brugg Cable, Brugg) formando 3 hélices concéntricas de 20 cm (H20), 40 cm (H40) y 60 cm (H60) de diámetro (Fig. 1b). El suelo se dejó secar al aire durante 4 semanas y se introdujo en la columna por capas controlando el volumen ocupado por un determinado peso del suelo mediante compactación para conseguir una densidad aparente de 1,5 g/cm³.

El procedimiento experimental para estudiar la infiltración consistió, primero, en verter la cantidad de agua para alcanzar una altura de agua media sobre la superficie del suelo, aproximada, de 1,5 cm, para lo que se empleó cinco minutos. Para ello, se contó con tres bidones de 35 L de capacidad con llave de desagüe en su extremo final a la que se conectó una tubería perforada con orificios circulares del mismo diámetro y separados una misma distancia. La tubería se colocó formando círculos sobre la superficie del suelo (ver Fig.1). Seguidamente, desde dos de los bidones, se vertió agua de forma continua durante 140 min aportándose un total de 441 L. La lámina de agua se distribuyó de forma variable, debido a las irregularidades de la superficie del suelo, oscilando entre 2 a 2,7 cm en el centro y parte derecha de la columna y de 1 a 1,7 cm en el resto.



Figura 1. Columna de suelo: (a) vista del extremo superior de la columna y (b) vista frontal.

2.2 Distribute Temperature Sensing DTS

La unidad de DTS utilizado registraba, cada 2 s, la temperatura con precisión de 0,1 °C y resolución espacial 12,5 cm. El cable estaba compuesto por cuatro fibras ópticas revestidas de un tubo capilar de acero inoxidable rodeado de filamentos también de acero inoxidable. Todo ello quedaba recubierto con una gruesa cubierta de nylon para su protección. Dos de las fibras ópticas se conectaron entre sí de manera que la misma sección de cable era recorrida dos veces por el láser. A los componentes metálicos del cable, se les aplicó una diferencia de potencial cuya potencia se reguló con un autotransformador conectado a la red eléctrica del laboratorio. La

resistencia de dichos componentes (0,365 W/m), y según la ley de Joule, el cable se calentaba a razón de 10 W/m durante el calentamiento.

La longitud de cable calentado fue 31m, de los cuales 18 m estaban enterrados en el suelo formando una red tridimensional de 148 puntos de medida. El cable se calentó ininterrumpidamente durante toda la infiltración sin alcanzar temperaturas tales que favoreciesen la evaporación del agua del suelo alrededor del cable. Asimismo, se utilizó un ventilador para enfriar la temperatura del cable fuera de la columna (ver Fig.1). Por otra parte, se llevaron a cabo dos pulsos caloríficos de 2 minutos, uno al comienzo de la infiltración y otro al final después de enfriarse el cable. Las temperaturas registradas se utilizaron para calcular la integral de temperatura acumulada en el pulso y correlacionarla con el contenido de agua inicial y final en el suelo a partir de la relación obtenida por Gil et al. 2011.

La calibración del DTS se llevó a cabo con 30 m de cable, que no se calentaron, introducidos en el interior de un baño de agua y hielo, manteniendo una temperatura de 0°C.

2.3 Determinación de la infiltración

La infiltración instantánea I se calculó a partir de la siguiente expresión de Perzlmair et al. (2004) que calcula el cambio de temperatura alrededor de un cilindro sometido a una fuente de calor.

$$\Delta T = \frac{q_L}{2\pi} \left[\frac{1}{\lambda_m} \ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right) + \frac{1}{\alpha r_a} \right] \quad [1]$$

donde: ΔT = incremento de temperatura durante el calentamiento (K); q_L = potencia calorífica (W/m); λ_m = conductividad térmica de la cubierta plástica del cable (W/(m K)); r_a = radio exterior de la cubierta plástica (m); r_i = radio interior de la cubierta plástica (m) y α = coeficiente de transferencia de calor.

Los valores de: λ_m = 0,25 W/(m K); r_a = 0,0019 m y r_i = 0,0017 m fueron proporcionados por el fabricante del cable y q_L = 10 W/m.

El número adimensional Nusselt Nu para un cilindro es:

$$Nu = \alpha \frac{D}{\lambda_l} \quad [2]$$

donde: D= diámetro del cilindro (m) y λ_l = conductividad térmica del líquido (W/(m K)). En este caso D= 0,00038 m y λ_l = 0,58(W/(m K)).

El coeficiente α se calcula por:

$$\alpha = \frac{1}{\left[\frac{\Delta T 2\pi}{q_L} - \frac{1}{\lambda_m} \ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right) \right]} = \frac{Nu \lambda_l}{D} \quad [3]$$

Complementariamente, el número Nu del movimiento convectivo en régimen laminar que sigue la ecuación de Darcy puede ser expresado según de Perzlmair et al. (2004) y Fand et al. (1993) por:

$$Nu = 1,248 R^{0,5} Pr^{0,3534} 1.325 \arctan g[(D/d)^{0,5}]^{0,5467} \quad [4]$$

donde : R = Número adimensional de Reynolds; Pr = Número adimensional de Prandtl y d = diámetro de las partículas de suelo (m). En un suelo franco arenoso, se ha considerado un diámetro medio d= 100 μ m según Woolhiser et al. (1990).

Al despejar R de la ec. anterior queda:

$$R = \left[\frac{Nu}{1,248 Pr^{0,3534} 1.325 \arctan g[(D/d)^{0,5}]^{0,5467}} \right]^2 = \frac{u D}{\nu} \quad [5]$$

donde: u= velocidad del líquido en el poro (m/s); D= diámetro del cilindro y ν = viscosidad cinemática del líquido (m²/s).

Según Perzlmair et al. (2004):

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa} \quad [6]$$

donde = la difusividad térmica efectiva expresada por:

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho c_l} \quad [7]$$

donde: λ = conductividad térmica efectiva (W/(m K)); ρ = densidad del líquido (kg/m³) y c_l = calor específico del líquido (J/kg K).

Para la T= 29 C se consideró: $\nu = 8,18 \cdot 10^{-7}$ m²/s, $\rho = 996$ kg/m³ y $c_l = 4179$ J/(kg K). Asimismo, $\lambda = 1,77$ W/(m K) correspondiente a un suelo franco arenoso dado por Ren et al. (2000).

Las ecuaciones anteriores pueden expresarse como:

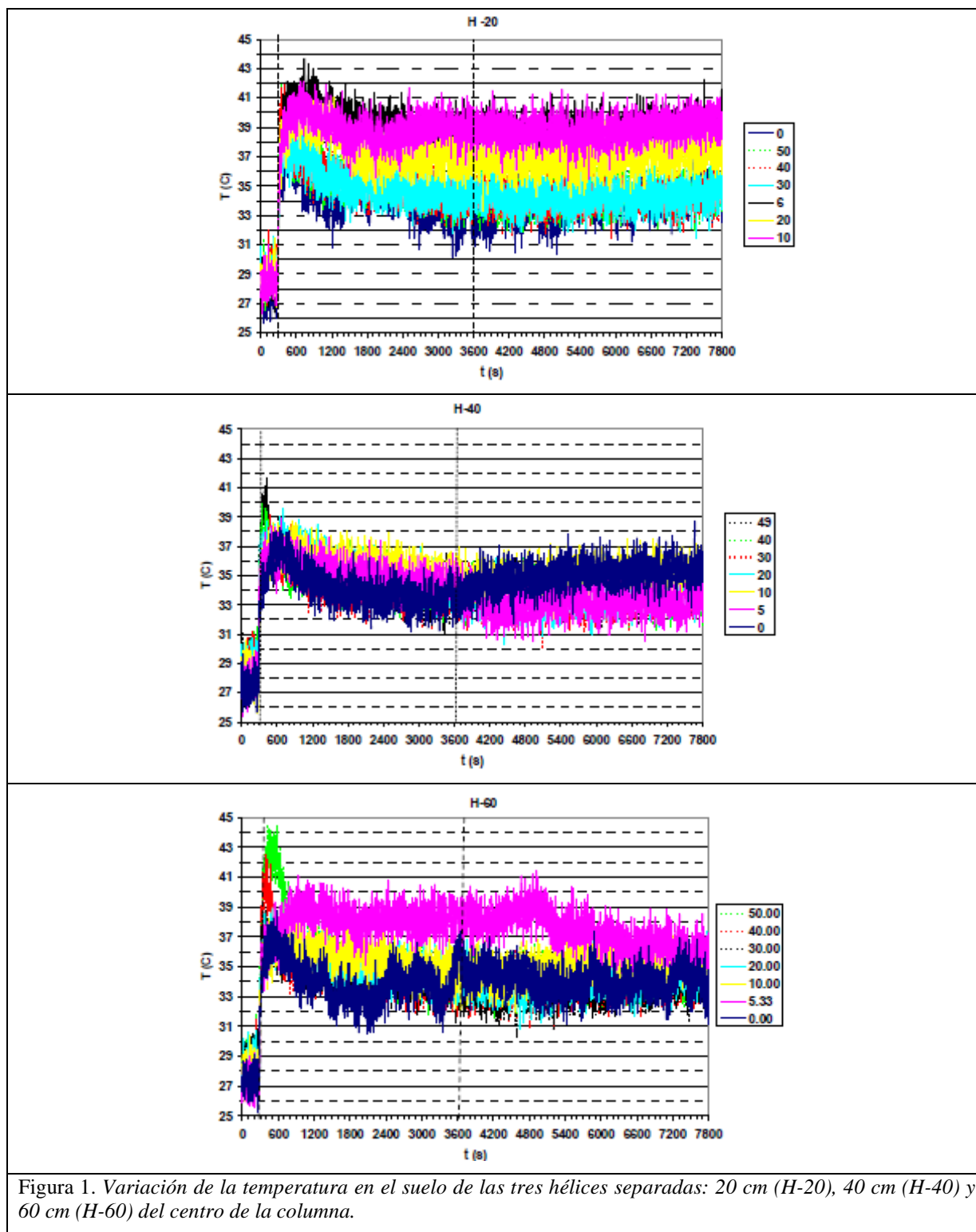
$$u = \frac{\nu}{D} \left[\frac{D}{\frac{\left[\frac{\Delta T 2 \pi}{q_L} - \frac{1}{\lambda_m} \ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right) \right] \lambda_m}{1,248 Pr^{0,3534} 1.325 \arctan g[(D/d)^{0,5}]^{0,5467}}} \right]^2 \quad [8]$$

La velocidad media de filtración se calcula multiplicando la velocidad del poro por la porosidad del suelo. Una porosidad típica de un suelo franco arenoso es 0,45 Rawl y Brakensiek (1983).

3 Resultados y discusión

Como se observa en la Fig. 2, la temperatura del suelo T alrededor del cable al principio del calentamiento era muy parecida en las tres zonas estudiadas. El calentamiento comenzó, aproximadamente a los 280s provocando un aumento de T brusco que después disminuyó ligeramente hasta los 3600 s, aproximadamente, donde se estabilizó. Se observa cierta variación de T a diferentes profundidades en cada suelo que rodea a las hélices que podría ser debida a la variabilidad espacial de las propiedades térmicas del suelo y al contenido de humedad.

Para determinar el incremento de temperatura ΔT , se ha considerado como temperatura inicial antes del calentamiento T_0 la media de los primeros 280 s y, como temperatura final T_f la media desde 3600 s en adelante. Los resultados se muestran en la Tabla 1.



	T_0 (C)	CV_{T0}	T_f (C)	CV_{Tf}
H20	29,03	0,030	34,34	0,024
H40	29,05	0,030	33,99	0,025
H60	28,80	0,028	34,29	0,024

Tabla 1. Temperaturas media inicial T_0 y final T_f y coeficientes de variación.

La variación de T_0 media es muy parecida con coeficientes de variación también similares, que no superaron el 0,03. El contenido volumétrico medio de agua fue 0,12 en el suelo más próximo a la superficie en todas las hélices sin embargo, en el fondo de la columna es ligeramente inferior debido a su proximidad con los orificios de drenaje. Su valor fue 0,11 en el suelo contiguo a las dos hélices interiores y 0,09 en la exterior.

La variación de T_f media es también similar pero con coeficientes de variación más pequeños (0,025). El contenido volumétrico medio del suelo, después de enfriarse el cable tras el calentamiento, varía linealmente desde la superficie (0,19) hasta el fondo (0,36).

La Fig. 3, muestra la variabilidad espacial de ΔT e infiltración instantánea media I , calculada con la ec. [8], correspondiente a una altura de agua media entre 1,5 a 2,5 cm sobre la superficie del suelo, en el tiempo comprendido entre los 60 min hasta los 140 min de calentamiento continuado. En ambas variables se observa una variabilidad espacial y variación más acusada en los primeros 30 cm de suelo con un comportamiento diferente del suelo de la parte central de la columna. Por el contrario, dichas variables presentan mayor uniformidad, con pocas diferencias en las zonas de suelo estudiadas, en los últimos 20 cm. Las diferencias observadas podrían deberse a la variabilidad espacial de las propiedades térmicas del suelo afectadas por su contenido de humedad.

Teniendo en cuenta las hipótesis consideradas en la ecuación de la infiltración utilizada, los valores determinados están dentro del intervalo 0,4 y 2,8 cm/d. Su valor medio es: 1,33 cm/d, 3,23 cm/d y 1,69 cm/d para H-20, H-40 y H-60, respectivamente con coeficientes de variación: 0,58, 0,26 y 0,41 para H-20, H-40 y H-60, respectivamente. La infiltración media en los últimos 20 cm es 1,56 veces mayor que la de la zona por encima de ella.

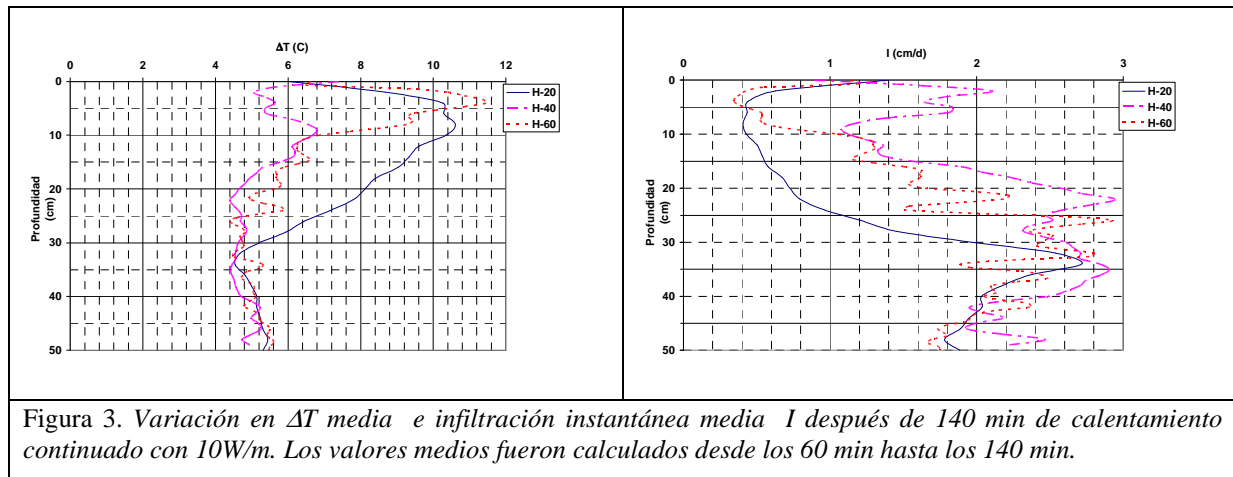


Figura 3. Variación en ΔT media e infiltración instantánea media I después de 140 min de calentamiento continuado con 10W/m. Los valores medios fueron calculados desde los 60 min hasta los 140 min.

4 Conclusiones

Aunque el contenido de humedad del suelo es similar al comienzo de la infiltración, ésta muestra variabilidad espacial más acusada en los primeros 30 cm y en la zona central de la columna de suelo. La infiltración es más uniforme en los últimos 20 cm observándose pocas variabilidad espaciales su valor medio fue 1,56 veces mayor que la de la zona más superficial. Estas diferencias podrían ser debidas a diferencias en las propiedades térmicas del suelo derivadas de su composición y contenido de humedad.

ElIAHFO method muestra su potencial para el estudio de la variabilidad espacial y temporal de la infiltración en el suelo así como para calcular su valor. Su estimación, podría mejorar en el futuro con el desarrollo otras expresiones más precisas que la utilizada en este trabajo. No obstante, estas estimaciones podrían ser de gran valor para la calibración de modelos relacionados con la gestión de recursos hídricos.

Referencias

- Fand, R. M., Varahasamy, M., y Greer, L. S. (1993). *Empirical correlation equations for heat transfer by forced convection from cylinders embedded in porous media that account for the wall effect and dispersion*. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36 (18), pp. 4407 – 4418.
- Freifeld, B.M., Finsterle, S., Onstott, T.C., Toole y P., Pratt, M. (2008). *Ground surface temperature reconstructions: Using in situ estimates for thermal conductivity acquired with a fiber-optic distributed thermal perturbation sensor*. Geophysical Research Letters, Vol. 35, L14309, DOI:10.1029/2008GL034762.
- Gil-Rodriguez, M., Rodríguez-Sinobas, L., Benítez Buelga, J., Sánchez, R., Juana, L. Castañón, G. y Laguna, F. V. *Use of DFOT heat pulse method for wetting pattern determination in drip irrigation emitters*, Comunicación al Congreso Int. European Geoscience Union (EGU).
- Muñoz-Carpena, R., and Parsons, J. E. (2000). *VFSMOD, v.1.04, User's Manual*. Raleigh, NC: North Carolina State University.
- Perzmaier, S., Aufleger, M., y Conrad, M. (2004a). *Distributed fibre optic temperature measurements in hydraulic engineering. – Prospects of the heat- up method*. In: Proceedings of the 72nd ICOLD Annual Meeting - Workshop on Dam Safety Problems and Solutions-Sharing Experience, Seoul, South Korea, May 16-22, 2004, Korean National Committee on Large Dams (KNCOLD), Seoul.
- Perzmaier, S., K.H. Straber, T. Srtrobl y M. Aufleger 2004b. *Integral seepage monitoring on open channel embankment dams by the DFOT heat pulse method*. Proceedings of the 72 Annual Meeting de la Int. Commission on Large Dams (ICOLD) celebrado en Seoul, Korea, 16 al 22 de mayo de 2004, pag.17.
- Perzmaier, S., Straßer, K.-H., Strobl, Th., y Aufleger, M. 2006. *Integral Seepage Monitoring on Open Channel Embankment Dams by the DFOT Heat Pulse Method*. 22nd ICOLD, Barcelona. Q. 86 – R. 12.
- Rawls, W.J. y Brakensiek, D.L. (1983). *A procedure to predict Green-Ampt infiltration parameters*. Adv. in Infiltration, pp. 102-112. ASAE Pub. no. 11-83.
- Ren, T., Kluitenberg, G. J., y Horton, R. (2000). *Determining soil water flux and pore water velocity by a heat pulse technique*, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 64, pp. 552 – 560.
- Sayde, C., C. Gregory, M. Gil-Rodriguez, N. Tufillaro, S. Tyler, N. van de Giesen, M. English, R. Cuenca y J. Selker. (2010). *Feasibility of soil moisture monitoring with fiber optics*. Water Resources Res. vol. 46, W06201, DOI:10.1029/2009WR007846.
- Selker, J.S, van de Giesen, N., Westhoff, M., Luxemburg, W y Parlange, M. B. (2006a). *Fiber optics opens window on stream dynamics*. Geophysical Research Letters, vol. 33, 124401, DOI:10.1029/2006gl027979.
- Selker, J.S., The´venaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., van de Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., Westhoff, M. y Parlange, M. B. (2006b). *Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems*. Water Resources research, vol. 42, w12202, DOI:10.1029/2006WR005326.
- Weiss, J. D. (2003). *Using Fiber Optics to Detect Moisture Intrusion into a Landfill Cap Consisting of a Vegetative Soil Barrier*. J. Air & Waste Manage. Assoc., 53:1130-1148.
- Westhoff, M.C., Savenije, H. H. G., Luxemburg, W. M. J, Stelling, G. S., van de Giesen, N. C., Selker, J. S., Pfister, L., y Uhlenbrook, S. (2007). *A distributed stream temperature model using high resolution temperature observations*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 11:1469–1480.
- Woolhiser, D. A., Smith, R.E. y Goodrich, D.C. (1990). *KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: ocumentation and User Manual*. USDA-ARS. ARS-Pub. no. 77.